

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra Energetiky**

**Řízení teploty spalin nad rosným bodem u kotle bez ohříváku
vzduchu**

**Control of the Flue Gas Temperature above the Dew Point of the
Boiler without Air Heater**

Student:

Marek Meixner

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student:

Marek Meixner

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R009 Provoz energetických zařízení

Téma:

Řízení teploty spalin nad rosným bodem u kotle bez ohříváku vzduchu
Control of the Flue Gas Temperature above the Dew Point of the Boiler
without Air Heater

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši zaměřenou na rosný bod spalin a řešení pro eliminaci nízkoteplotní koroze.
2. Navrhněte výpočtové schéma kotle na straně ohříváku vody a parního bubnu.
3. Stanovte tepelnou bilanci, výrobní teplo, účinnost kotle a spotřebu paliva.
4. Stanovte tepelnou bilanci vybraného řešení.
5. Vypracujte schéma uspořádání teplosměnných ploch.

Seznam doporučené odborné literatury:

VILIMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skriptum VŠB TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1853-5.


DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Skriptum ČVUT Praha, 1999. ISBN 80-01-02035-5.
www.fs.vsb.cz/euprojekty/414

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5.2012

Meixner
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Úřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2012


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Marek Meixner

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Josefa Lady 4090/3 Prostějov

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MEIXNER, M. *Řízení teploty spalin nad rosným bodem u kotle bez ohříváku vzduchu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 42 s. Vedoucí práce: Vilimec, L.

Bakalářská práce se zabývá problematikou řízení teploty spalin nad rosným bodem u kotle bez ohříváku vzduchu. V rešerši je popsán parní roštový kotel jako energetické zařízení a základní osvětlení problému nízkoteplotní koroze při spalování černého uhlí. Výpočtová část je tvořena základními stechiometrickými výpočty. Závěrečná část je tvořena dvěma návrhy ohřevu napájecí vody a výpočtem jejího množství.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MEIXNER, M. *Control of the Flue Gas Temperature above the Dew Point of the Boiler without Air Heater* : Bachelor Thesis. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2012, 42 s. Thesis head: Vilimec, L.

Bachelory thesis deals with the management of the flue gas temperature above the dew point of the boiler without air heater. The search is described as a steam grate boiler energy equipment and basic lighting low-temperature corrosion problem when burning coal. The design part is created by basic stoichiometric calculations. The final part consists of two feedwater heater design and calculation of its amount.

Obsah

1. Úvod.....	12
2. Parní kotel	12
2.1. Spalování.....	13
3. Roštový kotel	13
3.1. Regulace výkonu kotle s roštovým ohništěm.....	14
4. Rosný bod	14
4.1. Ohřívák vody.....	15
5. Koroze.....	16
5.1. Nízkoteplotní koroze při spalování uhlí.....	16
6. Stechiometrické výpočty.....	17
6.1. Minimální objem kyslíku potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva.....	17
6.2. Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva	17
6.3. Minimální objem vlhkého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva	18
6.4. Objem vzduchu skutečného suchého	18
6.5. Objem vzduchu skutečného vlhkého	18
6.6. Objem oxidu uhličitého.....	18
6.7. Objem oxidu siřičitého	19
6.8. Objem dusíku	19
6.9. Objem kyslíku	19
6.10. Objem suchých spalin.....	19
6.11. Objem vodní páry, ze spalování vodíku, odpařenou vlhkostí paliva a vlhkostí vzduchu.....	19
6.12. Objem vlhkých spalin z 1kg paliva tedy bude.....	19
6.13. Objem vlhkých spalin z 1 kg paliva při $t_{sp} = 155^{\circ}\text{C}$	20
6.14. Procentní složení spalin.....	20
6.15. Stanovení měrné tepelné kapacity spalin	21
7. Tepelná bilance a výrobní teplo.....	22
7.1. Schéma kotle	22
7.2. Stanovení entalpií.....	22
7.3. Množství odluhu.....	23
7.4. Množství napájecí vody	23
7.5. Výrobní teplo	23
8. Stanovení účinnosti kotle nepřímou metodou	23
8.1. Ztráta mechanickým nedopale	23
8.2. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	24
8.3. Ztráta citelným teplem spalin.....	25
8.4. Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	25

8.5.	Ztráta chemickým nedopalem	25
8.6.	Účinnost kotle	25
9.	Množství paliva.....	26
10.	Ochrana proti nízkoteplotní korozi.....	26
10.1.	Ohřev napájecí vody pomocí kotelní vody.....	26
10.2.	Ohřev sytou parou z parního bubnu v kondenzátoru.....	28
11.	Bilance přehřevu napájecí vody vybraného řešení	29
11.1.	Stanovení entalpií	30
11.2.	Bilanční výpočet (přehřev napájecí vody)	30
11.3.	Porovnání množství ohřáté vody v závislosti na její teploty	31
11.4.	Napájecí voda	32
12.	Schéma uspořádání teplosměnných ploch	32
12.1.	Schéma kondenzátoru	33
13.	Změna teploty vstupní ohřáté vody	35
13.1.	Rozdíl teploty ohřevu vody na teplotě větší a menší než zadaných 200°C	35
13.2.	Střední logaritmický rozdíl teplot.....	37
13.3.	Procentuální poměr změny plochy v závislosti na střední logaritmické hodnotě	38
14.	Závěr	40
15.	Seznam použité literatury	42

Přehled veličin:

V_{O_2min}	Minimální objem spalovacího kyslíku	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{VZSmin}	Minimální objem suchého spalovacího vzduchu	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{VZVmin}	Minimální objem vlhkého spalovacího vzduchu	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{VZS}	Skutečný objem suchého spalovacího vzduchu	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{VZV}	Skutečný objem vlhkého spalovacího vzduchu	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{CO_2}	Objem oxidu uhličitého	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{SO_2}	Objem oxidu siřičitého	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{N_2}	Objem dusíku	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{O_2}	Objem kyslíku	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{SS}	Objem suchých spalin	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{H_2O}	Objem vodní páry	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{SV}^{tSP}	Objem vlhkých spalin při teplotě spalin	$[m_n^3 \cdot kg^{-1}]$
ω_{CO_2}	Procentní objem oxidu uhličitého	$[\%]$
ω_{SO_2}	Procentní objem oxidu siřičitého	$[\%]$
ω_{N_2}	Procentní objem dusíku	$[\%]$
ω_{O_2}	Procentní objem kyslíku	$[\%]$
ω_{H_2O}	Procentní objem vodní páry	$[\%]$
C_{pCO_2}	Měrná tepelná kapacity oxidu uhličitého	$[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
C_{pSO_2}	Měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého	$[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
C_{pO_2}	Měrná tepelná kapacita kyslíku	$[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
C_{pN_2}	Měrná tepelná kapacity dusíku	$[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
C_{pH_2O}	Měrná tepelná kapacita vodní páry	$[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
C_{psp}	Objem vzduchu skutečného vlhkého	$[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
i_{pp}	Entalpie přehřáté páry	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
i_{NV}	Entalpie napájecí vody	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
i_O	Entalpie odluhu	$[kJ \cdot kg^{-1}]$

i_{OHR}	Entalpie ohřáté vody	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
\dot{m}_0	Množství odluhu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
\dot{m}_0	Množství odluhu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
\dot{m}_p	Množství páry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{NV}	Množství napájecí vody	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{OHR}	Množství ohřáté vody	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
t_{OHR}	Teplota ohřáté vody	$[\text{°C}]$
Q_v	Výrobní teplo	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$
Z_{Cstr}	Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce	[1]
Z_{Cpop}	Ztráta mechanickým nedopalem v popílku	[1]
Z_{C}	Ztráta mechanickým nedopalem	[1]
Z_{Fstr}	Ztráta fyzickým teplem ve strusce	[1]
Z_{Fpop}	Ztráta fyzickým teplem v popílku	[1]
Z_{f}	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	[1]
Z_{k}	Ztráta citelným teplem spalin	[1]
Z_{SV}	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	[1]
Z_{co}	Ztráta chemickým nedopalem	[1]
η_{K}	Účinnost kotle	[%]
M_{pal}	Skutečné množství paliva	$[\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$
M_{pv}	Množství spáleného paliva	$[\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$
p_{nv}	Tlak napájecí vody	[MPa]
t_{pp}	Teplota přehřáté páry	$[\text{°C}]$
p_{pp}	Tlak přehřáté páry	[MPa]
t_{szk}	Teplota spalin za kotlem	$[\text{°C}]$
t_{rb}	Teplota rosného bodu	$[\text{°C}]$
t_o	Teplota okolí	$[\text{°C}]$
γ	Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	[1]

Výpočtové parametry:

Prvkový rozbor černého uhlí (Polsko), surového vzorku (hmotnostně) „r“

$$C^r = 55,9 \quad [\%]$$

$$H^r = 3,2 \quad [\%]$$

$$S^r = 0,67 \quad [\%]$$

$$N^r = 0,85 \quad [\%]$$

$$O_2^r = 4,38 \quad [\%]$$

$$W^r = 9,8 \quad [\%]$$

$$A^r = 25,2 \quad [\%]$$

Výhřevnost paliva

$$Q_i^r = 20,18 \text{ [Mj} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Oběh voda/pára

Napájecí voda

$$t_{NV} = 105 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_{NV} = 38 \text{ [bar]} \text{ } 3,8 \text{ [Mpa]}$$

Pára

$$m_{PM} = 45 \text{ [t} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$t_{pp} = 450 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_{pp} = 38 \text{ [bar]}$$

$$\text{Teplota spalin za kotlem } t_{szk} = 155 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\text{Rosný bod spalin } t_{rb} = 120 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\text{Odluh } \sigma = 4 \text{ [\%]}$$

$$\text{Přebytek vzduchu na konci spalovací komory } \alpha_o = 1,3 \text{ [1]}$$

$$\text{Přebytek vzduchu za kotlem } \alpha_k = 1,4 \text{ [1]}$$

$$\text{Teplota okolí } t_o = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\text{Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti } \gamma = 1,03 \text{ [1]}$$

$$\text{Výhřevnost hořlaviny } Q_{ci} = 32600 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Ztráty

Podíl popela z celkového množství v nedopalu $X_{\text{pop}} = 18 \text{ [\%]}$

Podíl strusky z celkového množství v nedopalu $X_{\text{str}} = 82 \text{ [\%]}$

Podíl spalitelných látek v popílku $C_{\text{pop}} = 0,25 \text{ [1]}$

Podíl spalitelných látek ve strusce $C_{\text{str}} = 0,18 \text{ [1]}$

Teplota škváry $t_{\text{skr}} = 600 \text{ [}^\circ\text{C]}$

1. Úvod

Dnešní vzrůstající životní úroveň přináší zvyšující se spotřebu energie, která vede k ubývání zásob neobnovitelných zdrojů energie, proto jsou vyvíjeny snahy pro co nejvyšší hospodárnost a šetrnost k životnímu prostředí. Bakalářská práce je zaměřena na řízení teploty spalin nad rosným bodem u roštového kotle bez ohříváků vzduchu. Hlavním cílem je eliminovat nízkoteplotní korozi u parního kotle o výkonu 45t/h páry spalujícího černé uhlí.

V následujících letech se u parních kotlů odhaduje vývoj hlavně v oblasti regulace spotřeby energie, kdy stálou poptávku budou zajišťovat jaderné zdroje a regulaci tepelné. Parní kotle s roštovým ohništěm se nejčastěji využívají v kogenerační výrobě energie a tepla, nebo pro topenářské účely. Už méně se využívají pro výrobu čistě elektrické energie. Výkonnostně se běžně používají do výkonu 100 t/h páry maximálně do 200 t/h páry. U větších výkonů se používají práškové nebo fluidní kotle.

2. Parní kotel

Tato kapitola byla zpracována za pomoci literatury [1] a [2].

Kotel obecně lze definovat jako konstrukčně ucelený komplex zařízení pro transformaci

-primární energie fosilních paliv

-nebo energie tzv. Druhotných energetických zdrojů palivových nebo tepelných

na tepelnou energii pracovního média, a to vody nebo páry. Podle druhu pracovního média rozdělujeme kotle na kotle parní a kotle horkovodní.

Parní kotel považujeme za energetické zařízení, určené k výrobě páry z vody. Tepelná energie se především získává chemickou reakcí při spalování paliva. Kotel s roštovým ohništěm se skládá z podavače paliva a vhodného druhu spalovacího roštu. Existují varianty pro spalování různého druhu paliva, jako je uhlí nebo biomasa. Roštové kotle se staví i pro spalování samotné biomasy (dřevo, sláma) a dále i na spalování domácích a komunálních odpadů.

2.1. Spalování

Proces spalování lze v krátkosti popsat, jako chemický proces, kdy dochází k transformaci chemické energie na tepelnou energii obsažené v palivu. Spalování uhlí je nejstarší, „nejjednodušší“ a také nejčastější možnost jeho využití. Tento proces můžeme v krátkosti rozdělit do tří fází jako je zapalování, hoření, dohořívání. Proces zapalování je nejdůležitější část, dochází k sušení a ohřevu paliva následné uvolnění a zapálení prchavé hořlaviny. Hoření je stabilní režim, který lze regulovat a dochází při něm k uvolnění podstatné části tepla. V poslední části dohořívání dochází k vyhořívání posledních zbytků paliva.

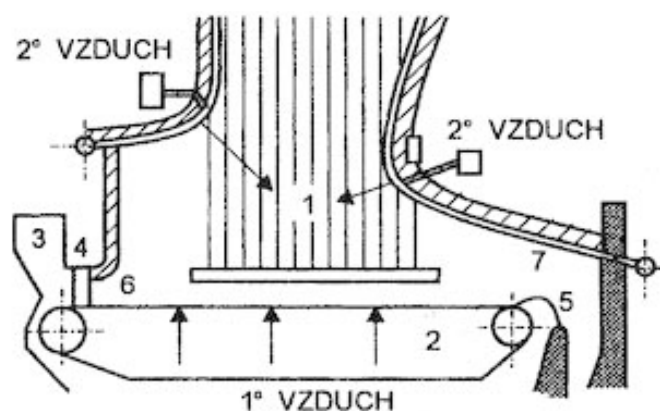
3. Roštový kotel

Tato kapitola byla zpracována za pomoci literatury [1] a [5].

Základní a dodnes nejjednodušší způsob spalování tuhých paliv je jejich spalování na roštu. Z hlediska principu jejich funkce a způsobu obsluhy lze je rozdělit do dvou základních skupin:

- s pevným roštem
- s mechanickým roštem

Slouží ke spalování tuhého paliva v pevné vrstvě. Spalování samotné probíhá ve dvou úrovních, a to uvnitř v pevné vrstvě a nad touto vrstvou. Podíl hoření nad vrstvou kolísá a je dán obsahem prchavé hořlaviny v palivu. Na obrázku jsou krátce popsány části kotle, který je vybaven řetězovým roštem umožňujícím trvalý posuv paliva.



Obr. 3-1 Pásový rošt bez pohazování paliva [5]

Rošt se skládá: 1 ohniště, 2 roštu, 3 zásobníku paliva, 4 hradítka, 5 výsypky a stěn ohniště 6 a 7. Rošt se pohybuje rychlostí 1–2 mm/s k výstupu, a poté co palivo prohoří, je tuhý zbytek (škvára, popel) dopravován přes škvárový jízek do škvárové výsypky.

Požadavky kladené na spalovací rošt:

1. Umožňovat postupné vysoušení paliva.
2. Podpírat kusové palivo.
3. Zajišťovat přívod spalovacího vzduchu.
4. Zajišťovat odvod tuhých zbytků po spálení z ohniště.
5. Umožňovat regulaci výkonu ohniště a tím i regulaci celého kotle.

3.1. Regulace výkonu kotle s roštovým ohništěm

Tato kapitola byla zpracována za pomoci literatury [4].

V kotli s roštovým ohništěm je poměr okamžité zásoby paliva v ohništi (množství uhlí na roštu) k právě spalovanému množství paliva daleko větší než je tomu u kotlů s práškovým ohništěm (spalování ve vznosu). Čas, který je potřebný pro změnu výkonu, roštového ohniště při změně množství uhlí na rošt může dosáhnout i desítky minut. Jestliže potřebujeme dosáhnout rychlou změnu výkonu roštového kotle, je taková změna výkonu proveditelná jen změnou množství spalovaného vzduchu nikoliv množstvím přiváděného uhlí na rošt. Změna množství spalovacího vzduchu se projeví výrazně rychleji množstvím uvolněného tepla v ohništi, protože se nemusí čekat na vyhoření zásoby paliva na roštu.

4. Rosný bod

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [3].

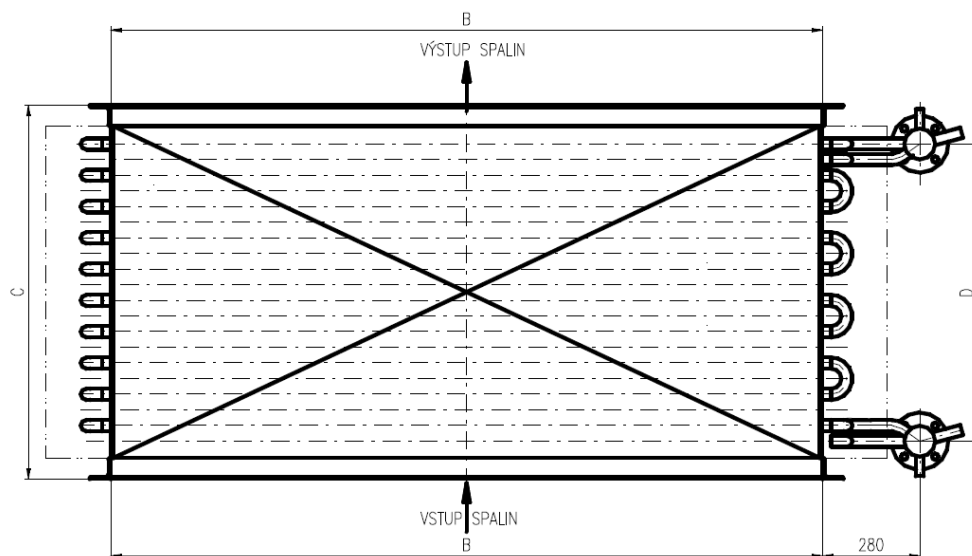
Rosným bodem spalin se označuje teplota, při které je dosaženo stavu nasycení par ve spalinách a začíná jejich kondenzace. Pokud palivo neobsahuje síru, dochází ke kondenzaci vodní páry. Jestliže se spaluje sirnaté palivo, dochází nejprve ke kondenzaci par kyseliny sírové, která má teplotu sytosti výrazně vyšší než vodní pára. Teplotu rosného bodu může zvyšovat přítomnost jemných tuhých částic ve spalinách, které fungují jako kondenzační jádra. Ke kondenzaci dochází především na studeném povrchu výhřevných ploch nebo kanálů, které pak trpí tzv. nízkoteplotní korozí. K zamezení

vzniku koroze je zapotřebí, aby teplota stěny ležela nad rosným bodem spalin. Při mírném podkročení rosného bodu koroze není příliš intenzivní.

Určení hodnoty rosného bodu spalin se považuje za složitý úkol. Přímé měření je proveditelné až na provozovaném kotli. Jeho hodnota navíc není stabilní a během provozu se může měnit. Ve většině případů se určuje podle poloempirických výpočtových vztahů.

4.1. Ohřívák vody

Ohřívák vody nazývaný též ekonomizér nebo zkráceně EKO je první výhřevnou plochou v parovodním traktu kotle. Pracovním médiem je voda. Ekonomizéry se navrhují jako svazky převážně v ležatém provedení pro zaručení dobré odvodnitelnosti. Ekonomizér slouží k vychlazení teploty spalin za kotlem. Při snižování teploty spalin je teplo předáváno napájecí vodě. Tím dochází k využití jinak odpadního tepla a zvýšení účinnosti kotle. Je důležité, aby teplota stěny kotle neklesla pod teplotu rosného bodu.



Obr. 4-1 Ekonomizér typu SEK firma SEA CZ [6]

5. Koroze

Tato kapitola byla zpracována za pomoci literatury [2] a [3].

Korozi můžeme definovat jako znehodnocení materiálů, které vzniká vzájemným chemickým působením materiálu a prostředí. Jejich působením vznikají chemické sloučeniny kovů.

Korozi můžeme rozdělit podle různých faktorů na:

- Rovnoměrná (plošná) koroze
- Důlková koroze
- Štěrbinová koroze
- Mezikrystalová koroze
- Koroze za napětí
- Galvanická koroze
- Erozivní koroze
- Nízkoteplotní
- Vysokoteplotní

5.1. Nízkoteplotní koroze při spalování uhlí

Spalujeme li uhlí, je výskyt nízkoteplotní koroze zcela předpokládaným a běžným jevem. Můžeme především omezit její rozsah a zmenšit její účinek. Řídit se můžeme dvěma směry, jako je zaměřit se na odstranění příčin vzniku koroze nebo omezit její účinky.

Kombinace těchto metod není vyloučená.

Nízkoteplotní koroze se vyskytuje u těch částí parního kotle, kde mohou působit kondenzující složky spalin. To jsou především teplosměnné plochy (ale také vyzdívky, izolace, oplechování, části ocelkové konstrukce, plechové kanály). Některé složky (SO_2 , SO_3 , HCl a jiné) spalin, které obsahují vodní páru ve spalinách při určité teplotě a dalších podmínkách vytvářejí páry dané kyseliny. Tyto páry při ochlazení na teplotu nižší než je jejich rosný bod při daném parciálním tlaku kondenzují a vzniká tak agresivní kondenzát, který napadá materiál kotle.

Účinek je především závislý na koncentraci korozivních složek a na pracovních podmínkách provozovaného zařízení, a to především na teplotě, přebytku vzduchu a

fyzikálních a chemických vlastnostech popílku ve spalinách. Nízkoteplotní koroze tedy vzniká především v místech, kde teplota povrchu a mezní vrstvy v její těsné blízkosti klesne pod teplotu kondenzace vodní páry nebo par kyseliny sírové při daném parciálním tlaku.

Teplota rosného bodu vodní páry především závisí na obsahu vody ve spalinách.

6. Stechiometrické výpočty

Tato kapitola byla vypracovaná na základě literatury [3].

Stechiometrické výpočty slouží ke stanovení objemu vzduchu potřebného pro spalování jednotkového množství paliva a objemu spalin, které při spalování vzniknou. Vychází se při nich ze základních chemických rovnic, kterým se pak říká stechiometrické spalovací rovnice. Rozlišujeme dva základní modely z hlediska spalování, dokonalého a nedokonalého. Model nedokonalého spalování, připouští částečné vyhoření paliva se vznikem nedopalu. Model dokonalého spalování předpokládá dokonalé spálení veškeré hořlaviny v palivu. V praxi se pro zjednodušení používá model dokonalého spalování při $\alpha = 1$, protože odchylka od reálného modelu spalování je velmi malá a lze jí zanedbat.

6.1. Minimální objem kyslíku potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{O_2\min} = 22,34 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^s}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.1]$$

$$V_{O_2\min} = 22,34 \cdot \left(\frac{0,559}{12,01} + \frac{0,032}{4,032} + \frac{0,0067}{32,06} - \frac{0,0438}{32} \right)$$

$$V_{O_2\min} = 1,1913 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.2. Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VZS\min} = \frac{V_{O_2\min}}{0,21} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.2]$$

$$V_{VZS\min} = \frac{1,1913}{0,21}$$

$$V_{VZS\min} = 5,6724 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.3. Minimální objem vlhkého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VZVmin} = \gamma \cdot V_{VZSmin} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.3]$$

$$V_{VZVmin} = 1,03 \cdot 5,6724$$

$$V_{VZVmin} = 5,842 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.4. Objem vzduchu skutečného suchého

$$V_{VZS} = \alpha \cdot V_{VZSmin} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.4]$$

$$V_{VZS} = 1,4 \cdot 5,6724$$

$$V_{VZS} = 7,9414 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.5. Objem vzduchu skutečného vlhkého

$$V_{VZV} = \gamma \cdot V_{VZS} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.5]$$

$$V_{VZV} = 1,03 \cdot 7,9414$$

$$V_{VZV} = 8,1796 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.6. Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12,01} \cdot C^r [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.6]$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12,01} \cdot 0,559$$

$$V_{CO_2} = 1,0426 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.7. Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32,06} \cdot S^r [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.7]$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32,06} \cdot 0,0067$$

$$V_{SO_2} = 0,00468 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.8. Objem dusíku

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{VZS} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.8]$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0085 + 0,79 \cdot 7,9414$$

$$V_{N_2} = 6,2805 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.9. Objem kyslíku

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{VZSmin} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.9]$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,4 - 1) \cdot 5,6724$$

$$V_{O_2} = 0,4765 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.10. Objem suchých spalín

$$V_{SS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.10]$$

$$V_{SS} = 1,0426 + 0,00468 + 6,2805 + 0,4765$$

$$V_{SS} = 7,8043 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.11. Objem vodní páry, ze spalování vodíku, odpařenou vlhkostí paliva a vlhkostí vzduchu

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + (\gamma - 1) \cdot V_{VZS} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.11]$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{4,032} \cdot 0,032 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,098 + (1,03 - 1) \cdot 7,9414$$

$$V_{H_2O} = 0,5379 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.12. Objem vlhkých spalín z 1kg paliva tedy bude

$$V_{SV} = V_{SS} + V_{H_2O}^s [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad [6.12]$$

$$V_{SV} = 7,8043 + 0,7186$$

$$V_{SV} = 8,5229 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

6.13. Objem vlhkých spalin z 1 kg paliva při $t_{sp} = 155^\circ\text{C}$

$$V_{SV}^{t_{SP}} = V_{SP} \cdot \frac{273 + t_{SP}}{273} [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad [6.13]$$

$$V_{SV}^{t_{SP}} = 8,5229 \cdot \frac{273 + 155}{273}$$

$$V_{SV}^{t_{SP}} = 13,3619 [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

6.14. Procentní složení spalin

Procentní objem oxidu uhličitého

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{1,0426}{8,5229} \cdot 100 = 12,2443 [\%] \quad [6.14]$$

Procentní objem oxidu siřičitého

$$\omega_{\text{SO}_2} = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,00468}{8,5229} \cdot 100 = 0,0549 [\%] \quad [6.15]$$

Procentní objem dusíku

$$\omega_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{6,2805}{8,5229} \cdot 100 = 73,6897 [\%] \quad [6.16]$$

Procentní objem kyslíku

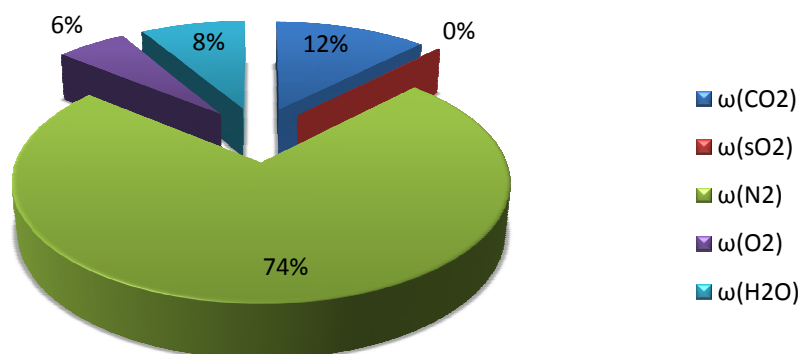
$$\omega_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,4765}{8,5229} \cdot 100 = 5,5908 [\%] \quad [6.17]$$

Procentní objem vodní páry

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,5379}{8,5229} \cdot 100 = 6,3112 [\%] \quad [6.18]$$

$$\sum \omega = 100 [\%]$$

Procentní složení spalín



Graf. 6-1 Procentní složení spalín

6.15. Stanovení měrné tepelné kapacity spalín

K určení měrných tepelných kapacit jsem dosadil hodnoty z tabulky 4.9 z literatury [3]. Pro přesnější určení při teplotě 155°C jsem použil interpolační metodu.

$$C_{p\text{CO}_2} = \frac{1,7863 - 1,6996}{200 - 100} \cdot (155 - 100) + 1,6996 = 1,7473 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad [6.19]$$

$$C_{p\text{SO}_2} = \frac{1,9427 - 1,8631}{200 - 100} \cdot (155 - 100) + 1,8631 = 1,9069 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad [6.20]$$

$$C_{p\text{O}_2} = \frac{1,3372 - 1,3193}{200 - 100} \cdot (155 - 100) + 1,3193 = 1,3291 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad [6.21]$$

$$C_{p\text{N}_2} = \frac{1,2994 - 1,2951}{200 - 100} \cdot (155 - 100) + 1,2951 = 1,2975 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad [6.22]$$

$$C_{p\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,5227 - 1,5062}{200 - 100} \cdot (155 - 100) + 1,5062 = 1,5153 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad [6.23]$$

$$C_{p\text{sp}} = C_{p\text{CO}_2} \cdot \omega_{\text{CO}_2} + C_{p\text{SO}_2} \cdot \omega_{\text{SO}_2} + C_{p\text{O}_2} \cdot \omega_{\text{O}_2} + C_{p\text{N}_2} \cdot \omega_{\text{N}_2} + C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}} \quad [6.24]$$

$$C_{p\text{sp}} = 1,7473 \cdot 0,1224 + 1,9069 \cdot 0,000528 + 1,3291 \cdot 0,0559 + 1,2975 \cdot 0,7368 + 1,5153 \cdot 0,0843$$

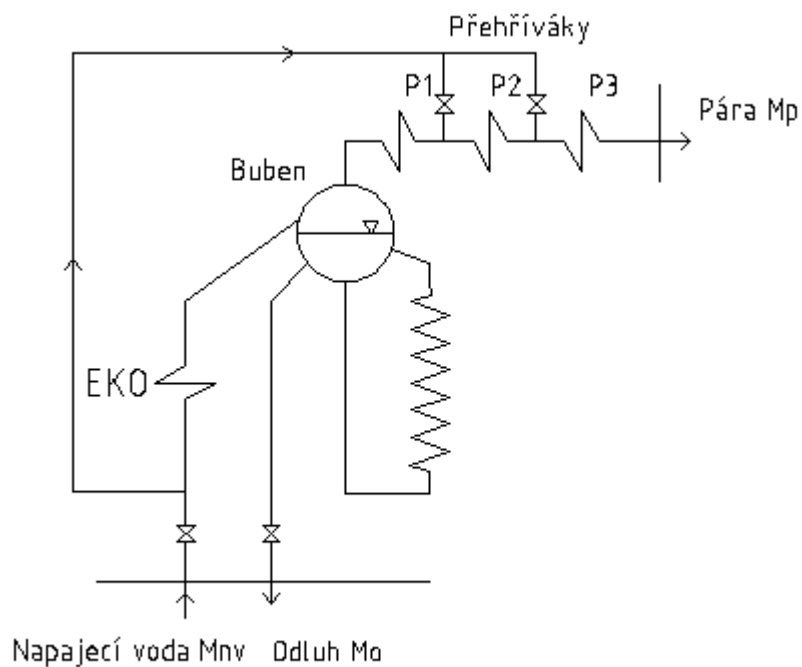
$$C_{p\text{sp}} = 1,4134 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

7. Tepelná bilance a výrobní teplo

Tlak v celém kotli byl po konzultaci s vedoucím bakalářské práce stanoven na 3,8 [MPa].

Ztráty vyskytující se v systému nebudou brány v potaz.

7.1. Schéma kotle



obr. 7-1 Schéma kotle

7.2. Stanovení entalpií

Entalpie stanoveny pomocí programu ESS.

Entalpie přehřáté páry při teplotě 450°C a tlaku 3,8 MPa

$$i_{pp} = 3334 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Entalpie napájecí vody při teplotě 105°C a tlaku 3,8 MPa

$$i_{NV} = 443 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Entalpie odluhu při tlaku 3,8 MPa

$$i_o = 1073 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

7.3. Množství odluhu

$$\dot{m}_o = \sigma \cdot \dot{m}_p \text{ [kg/s]} \quad [7.1]$$

$$\dot{m}_o = 0,04 \cdot 12,5$$

$$\dot{m}_o = 0,5 \text{ [kg/s]}$$

7.4. Množství napájecí vody

$$\dot{m}_{NV} = \dot{m}_p + \dot{m}_o \text{ [kg/s]} \quad [7.2]$$

$$\dot{m}_{NV} = 12,5 + 0,5$$

$$\dot{m}_{NV} = 13 \text{ [kg/s]}$$

7.5. Výrobní teplo

$$Q_v = \dot{m}_p \cdot (i_{pp} - i_{NV}) + \dot{m}_o \cdot (i_o - i_{NV}) \text{ [kJ} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [7.3]$$

$$Q_v = 12,5 \cdot (3334 - 443) + 0,5 \cdot (1073 - 443)$$

$$Q_v = 36,452 \text{ [MJ} \cdot \text{s}^{-1}]$$

8. Stanovení účinnosti kotle nepřímou metodou

8.1. Ztráta mechanickým nedopale

Představuje ztrátu nespálenou hořlavinou v tuhých zbytcích, zachycených v ohništi.

Ve strusce

$$Z_{Cstr} = \frac{C_{str}}{1 - C_{str}} \cdot X_{str} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ci} \text{ [1]} \quad [8.1]$$

$$Z_{Cstr} = \frac{0,18}{1 - 0,18} \cdot 0,82 \cdot \frac{0,252}{20180} \cdot 32600$$

$$Z_{Cstr} = 0,0733 \text{ [1]}$$

Popílku

$$Z_{Cpop} = \frac{C_{pop}}{1 - C_{pop}} \cdot X_{pop} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ic} [1] \quad [8.2]$$

$$Z_{Cpop} = \frac{0,25}{1 - 0,25} \cdot 0,18 \cdot \frac{0,252}{20180} \cdot 32600$$

$$Z_{Cpop} = 0,0246 [1]$$

Celková ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{Cstr} + Z_{Cpop} [1] \quad [8.3]$$

$$Z_C = 0,0733 + 0,0246$$

$$Z_C = 0,0979 [1]$$

8.2. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem ve strusce

$$C_{str} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^3 \cdot t_{skr} [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad [8.4]$$

$$C_{str} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^3 \cdot 600$$

$$C_{str} = 1,0132 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$Z_{Fstr} = \frac{X_{str}}{1 - C_{istr}} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot C_i \cdot t_{skr} [1] \quad [8.5]$$

$$Z_{Fstr} = \frac{0,82}{1 - 0,18} \cdot \frac{0,252}{20180} \cdot 1,0132 \cdot 600$$

$$Z_{Fstr} = 0,00759 [1]$$

Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$C_{pop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^3 \cdot t_{szk} [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad [8.6]$$

$$C_{pop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^3 \cdot 155$$

$$C_{pop} = 0,78981 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$Z_{Fpop} = \frac{X_{pop}}{1 - C_{pop}} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot C_{ipop} \cdot t_{str} [1] \quad [8.7]$$

$$Z_{fpop} = \frac{0,18}{1 - 0,25} \cdot \frac{0,252}{20180} \cdot 0,78981 \cdot 155$$

$$Z_{fpop} = 0,0004 [1]$$

Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = Z_{fSTR} + Z_{fpop} [1] \quad [8.8]$$

$$Z_f = 0,00759 + 0,0003668$$

$$Z_f = 0,0079568 [1]$$

8.3. Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{V_{SV}^{ts} \cdot C_{psp} \cdot (t_{spl} - t_o)}{Q_i} [1] \quad [8.9]$$

$$Z_k = (1 - 0,0979) \cdot \frac{13,3607 \cdot 1,4134 \cdot (155 - 20)}{20180}$$

$$Z_k = 0,114 [1]$$

8.4. Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Dle literatury [3] Obr. 5-1 Ztráta sdílení tepla do okolí stanovena na:

$$Z_{SV} = 0,006 [1] \quad [8.10]$$

8.5. Ztráta chemickým nedopalem

Při spalování paliva s vyšší výhřevností lze tuto ztrátu zanedbat.

$$Z_{co} = 0 [1] \quad [8.11]$$

8.6. Účinnost kotle

$$\eta_K = (1 - Z_c - Z_f - Z_k - Z_{sv} - Z_{co}) \cdot 100 [\%] \quad [8.12]$$

$$\eta_K = (1 - 0,0979 - 0,0079568 - 0,114 - 0,006 - 0) \cdot 100$$

$$\eta_K = 77,41 [\%]$$

9. Množství paliva

Skutečné množství paliva

$$M_{\text{pal}} = \frac{Q_{\text{vyr}}}{Q_i^r \cdot \eta_k} [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad [9.1]$$

$$M_{\text{pal}} = \frac{36,43}{20,18 \cdot 0,7741}$$

$$M_{\text{pal}} = 2,332 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$M_{\text{pal}} = 8,3954 [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Množství spáleného paliva

$$M_{\text{pv}} = m_{\text{pal}} \cdot (1 - Z_C) [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad [9.2]$$

$$M_{\text{pv}} = 2,332 \cdot (1 - 0,0979)$$

$$M_{\text{pv}} = 2,1037 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

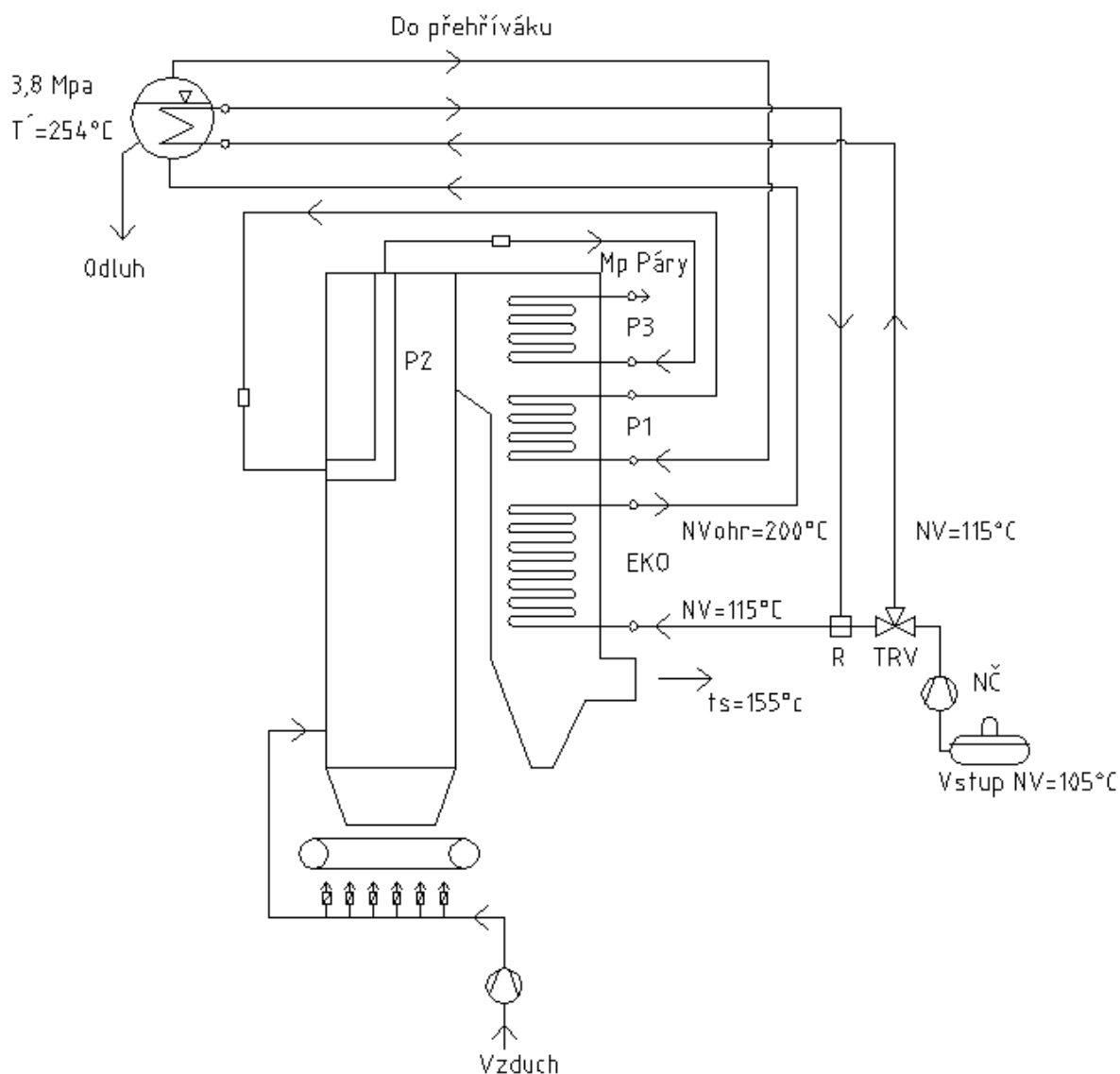
$$M_{\text{pv}} = 7,5733 [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$$

10. Ochrana proti nízkoteplotní korozi.

Cílem řešení problému nízkoteplotní koroze je zajistit aby teplota stěny trubky ohříváku napájecí vody neklesla pod hodnotu rosného bodu. U spalín je zadána teplota rosného bodu $t_{\text{rb}} = 120^\circ\text{C}$. Teplotu stěny nad rosným bodem udržujeme předeheřevem napájecí vody na potřebnou teplotu. Předeheřev můžeme provést dvěma způsoby. Ohřevem kotelní vodou ve výměníku tepla, nebo kondenzací syté páry. Pro ochranu před nízkoteplotní korozi byla v zadání stanovena vstupní teplota do EKA ve výši 115°C

10.1. Ohřev napájecí vody pomocí kotelní vody

Ohřátí napájecí vody v parním bubnu je lacinější alternativa, ale tím že je teplosměnná plocha ponořená pod hladinou tak zabírá prostor v bubnu. Komplikuje provádění každoročních revizí bubnu, kdy může být nutná pro provedení revize i demontáž. Další nevýhodou je, že teplosměnná plocha prochází přes hladinu, kdy jedna část je ponořena ve vodě a druhá je vystavená syté páře. Tím dochází především v místě přechodu průchodu trubky přes hladinu ke střídanému a k rozpouštění soli a tím ke korozi trubky teplosměnné plochy.



Obr. 10-1 Předehřev napájecí vody pomocí kotelní vody

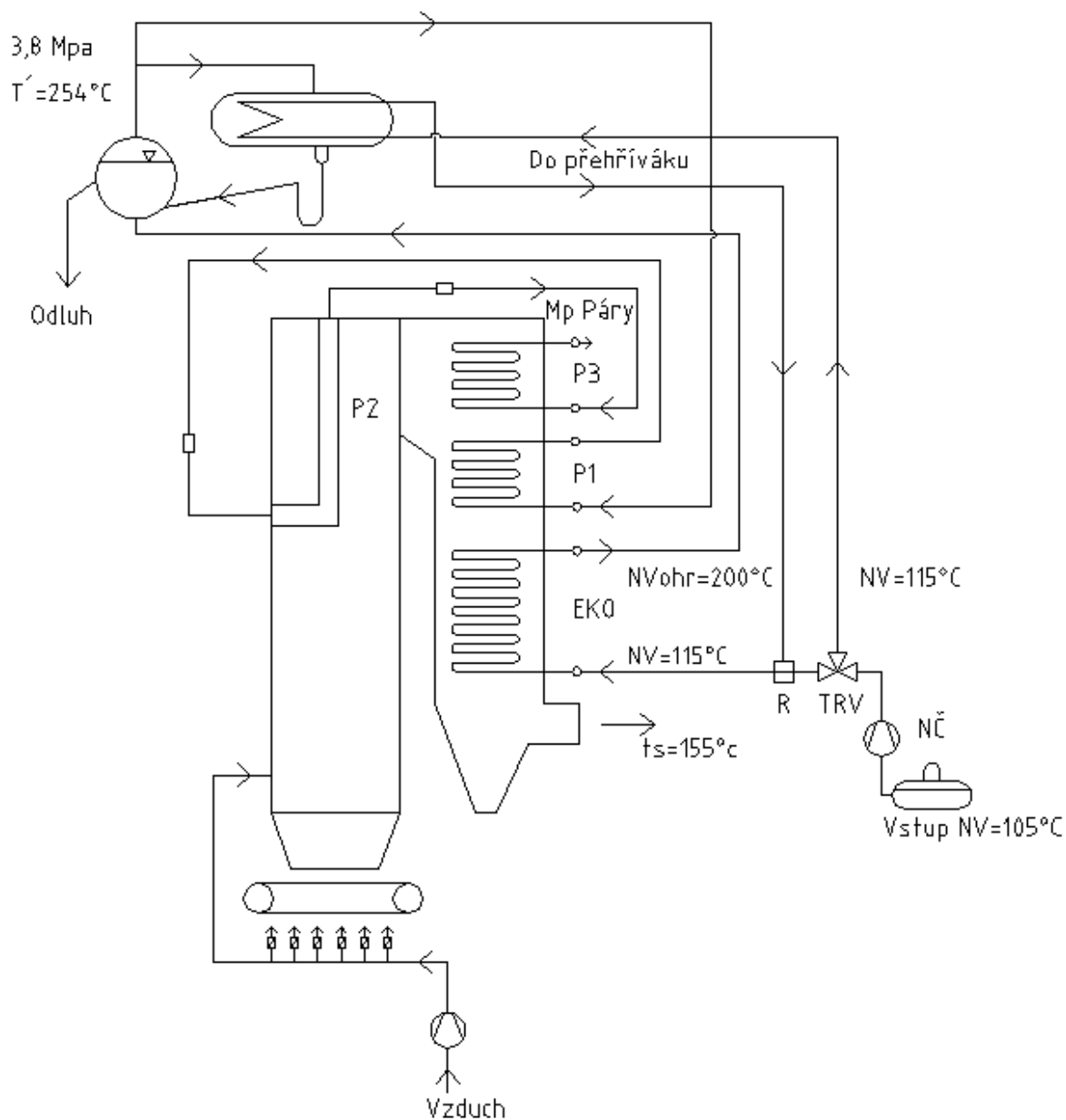
Ohřátí napájecí vody před vstupem do EKA na 115°C se provede teplosměnnou plochou, která je umístěna ve vodní části parního bubnu. Přívod napájecí vody do výměníku reguluje trojcestný regulační ventil TRV. Regulator R následně podle vyhodnocených parametrů vrací požadované množství ohřáté vody do systému a putuje do ohříváku napájecí vody při minimální teplotě $t_{s1}=115^{\circ}\text{C}$. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 10-1 a schéma vstříku na Obr. 11-1.

Předpokládáme, že teplota stěny trubky ohříváku vody bude o 5°C vyšší, tedy 120°C což je hodnota rosného bodu.

10.2. Ohřev sytou parou z parního bubnu v kondenzátoru

Princip ohřevu z hlediska tepelné bilance je stejný, jiné je konstrukční provedení.

Ohřátí napájecí vody v parním kondenzátoru je poněkud dražší metoda, kdy ohřev napájecí vody není proveden v kotli, ale mimo něj. Tím se nemusí zasahovat do prostoru parního bubnu a prostor v něm zůstává volný, ale navíc je třeba instalovat další tepelný výměník.



Obr. 10-2 Ohřev sytou parou z parního bubnu v kondenzátoru

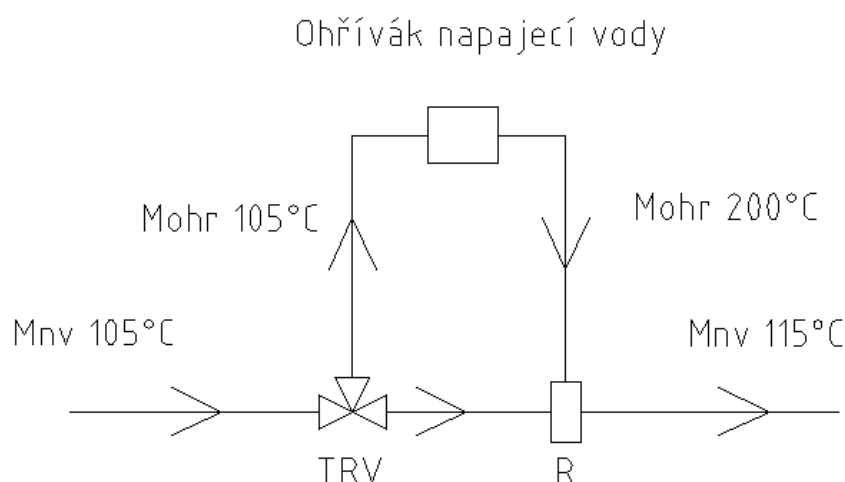
Místo ohřevu kotelní vodou se použije ohřev sytou parou z parního bubnu v kondenzátoru. Napájecí voda se ohřívá kondenzací syté páry, přičemž kondenzát se následně vracen zpět do parního bubnu Obr. 10-2.

11. Bilance přehřevu napájecí vody vybraného řešení

V bubnu kotle je saturační teplota varu vody při tlaku 38 bar $t_{SAT} = 254\text{ }^{\circ}\text{C}$.

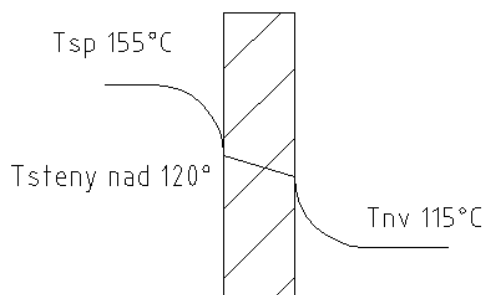
V tomto bubnu lze ohřívat napájecí vodu pomocí jak kotelní vody, tak i sytou parou z bubnu. Bilanční výpočty výparníku jsou u obou metod stejné. V mém případě jde o výpočet potřebného množství ohřáté napájecí vody \dot{m}_{OHR} o zadané teplotě,

$t_{OHR} = 200^{\circ}\text{C}$ která je vpouštěná směšovacím ventilem do napájecí vody o teplotě $t_{NV} = 105^{\circ}\text{C}$, tak aby výsledná teplota po smíšení činila $t_{NV} = 115^{\circ}\text{C}$



Obr. 11-1 Schéma vstřiku napájecí vody

Teplota napájecí vody ohřátá na 115°C mi zaručí, že teplota stěny trubky ohříváku vody bude minimálně 120°C a více. Tloušťka stěny je 3mm takže přestup tepla je zanedbatelný, protože rozdíl teploty může maximálně činit $0,5^{\circ}\text{C}$ až 2°C . Schéma prostupu stěnou ekonomizéru je zobrazen na Obr. 11-2.



Obr. 11-2 Schéma prostupu tepla EKO

11.1. Stanovení entalpií

Entalpie stanoveny pomocí programu ESS.

Entalpie kotelní vody při teplotě 200°C a tlaku 3,8 MPa

$$i_{\text{OHR}} = 853,2 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Entalpie napájecí vody při teplotě 105°C a tlaku 3,8 MPa

$$i_{\text{NV}} = 443 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Entalpie napájecí vody při teplotě 115°C a tlaku 3,8 MPa

$$i_1 = 485,2 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

11.2. Bilanční výpočet (přehřev napájecí vody)

Hmotnostní bilance dle Obr. 11-1

$$\dot{m}_{\text{NV}} - \dot{m}_{\text{OHR}} + \dot{m}_{\text{OHR}} = \dot{m}_{\text{NV}} \quad [11.1]$$

Z rovnice je patrné že množství napájecí vody se nemění.

Tepelná bilance dle Obr. 11-1

$$\dot{m}_{\text{NV}} \cdot i_{115} = (\dot{m}_{\text{NV}} - \dot{m}_{\text{OHR}}) \cdot i_{105} + \dot{m}_{\text{OHR}} \cdot i_{200} \quad [11.2]$$

Z rovnice můžeme následně stanovit množství ohřáté napájecí vody

Výpočet množství ohřáté vody

$$\dot{m}_{OHR} = \frac{\dot{m}_{NV} \cdot i_{115} - \dot{m}_{NV} \cdot i_{105}}{i_{200} - i_{105}} \text{ [kg/s]} \quad [11.3]$$

$$\dot{m}_{OHR} = \frac{13 \cdot 485,2 - 13 \cdot 443}{853,2 - 443}$$

$$\dot{m}_{OHR} = 1,348 \text{ [kg/s]}$$

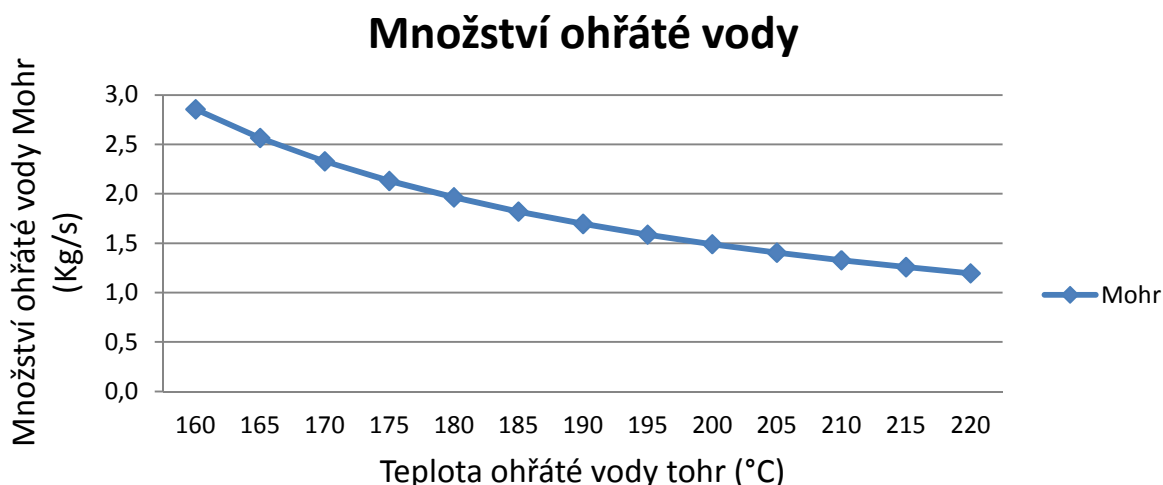
Množství potřebné napájecí vody je $\dot{m}_{NV} = 13 \text{ [kg/s]}$ o teplotě 115°C , kterou dostanu tak, že regulačním ventilem se vpustí do napájecí vody o teplotě 105°C ohřátá napájecí voda o teplotě 200°C v množství $\dot{m}_{OHR} = 1,348 \text{ [kg/s]}$.

11.3. Porovnání množství ohřáté vody v závislosti na její teploty

Tabulka slouží k porovnání množství vypouštěné ohřáté vody t_{OHR} v závislosti na její teplotě. Rozmezí teplot jsem volil od 160°C do 220°C . Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 11-1.

$T_{OHR} [^\circ\text{C}]$	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
$M_{OHR} \text{ [kg/s]}$	2,86	2,57	2,33	2,13	1,96	1,82	1,70	1,59	1,49	1,40	1,33	1,26	1,20

Tab. 11-1 Tabulka s výslednými hodnotami



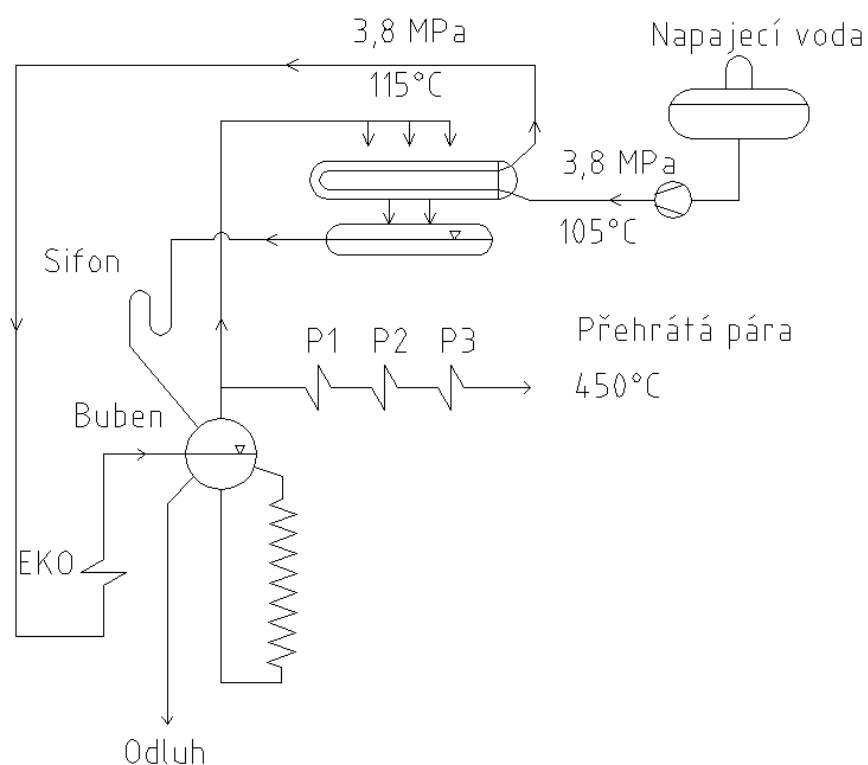
Graf. 11-1 Množství ohřáté vody

Z tabulky 11-1 a grafu Graf. 11-1 je patrné, že pro předehřev vody na 115°C potřebné množství ohřáté vody \dot{m}_{OHR} úměrně klesá s teplotou t_{OHR} .

11.4. Napájecí voda

Požadavky kladené na kvalitu napájecí vody parních kotlů závisí na typu kotle. Upravená voda musí být úplně zbavená všeho, co není vodou, tedy mechanických nečistot, organických látek. Plyny, které mohou způsobovat korozi jako je kyslík a kysličník uhličitý musí být odstraněny. Rovněž obsah soli musel být snížen tak, aby se dostala požadovaná vodivost. V částech vysokého tepelného zatížení varných trubek mohou tyto organické sloučeniny vytvářet korozivní produkty, které výrazně snižují přestup tepla z povrchu trubky do kotlové vody. Tím by docházelo k přehřívání stěny trubek a následnému přídavnému namáhání. U bubnového kotle je regulace obsahu soli v kotelní vodě provedena pomocí odluhu.

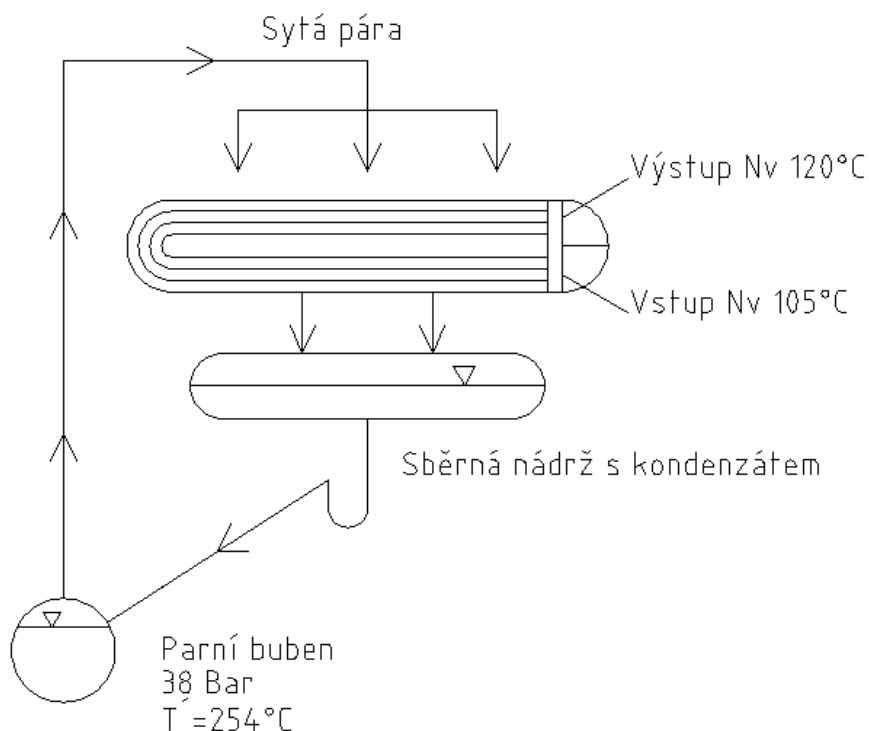
12. Schéma uspořádání teplosměnných ploch



Obr. 12-1 Schéma uspořádání teplosměnných ploch

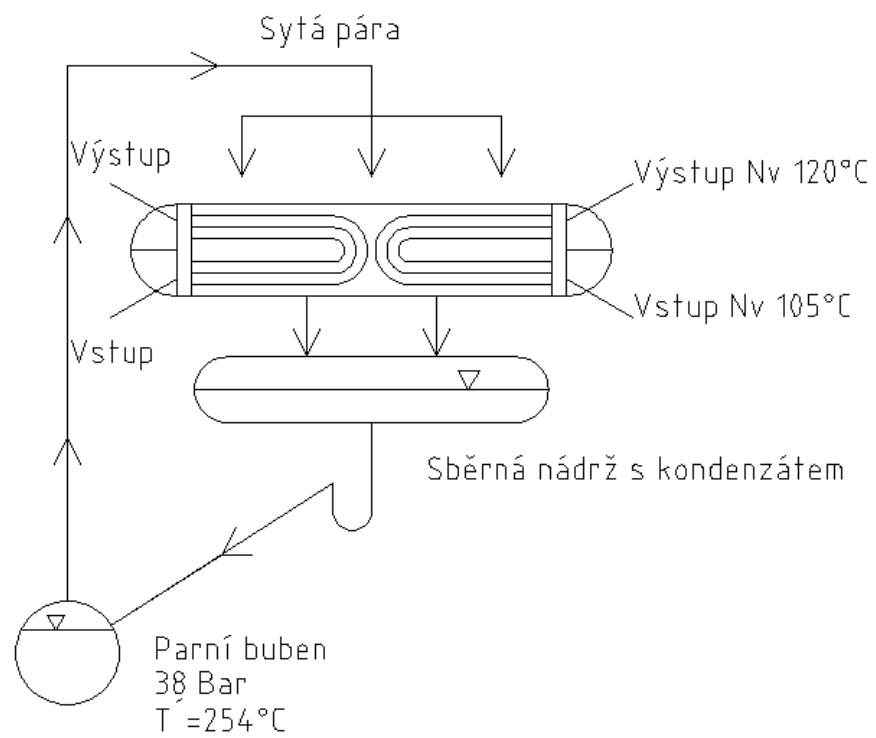
12.1. Schéma kondenzátoru

Na Obr. 12-2 je zobrazeno schéma kondenzátoru, který slouží k ohřevu napájecí vody. Médium, které předává teplo napájecí vodě je sytá pára z parního bubnu. Ta při sdílení tepla kondenzuje a kondenzát se shromažďuje v nádrži. Následně se vrací přes sifon do parního bubnu.

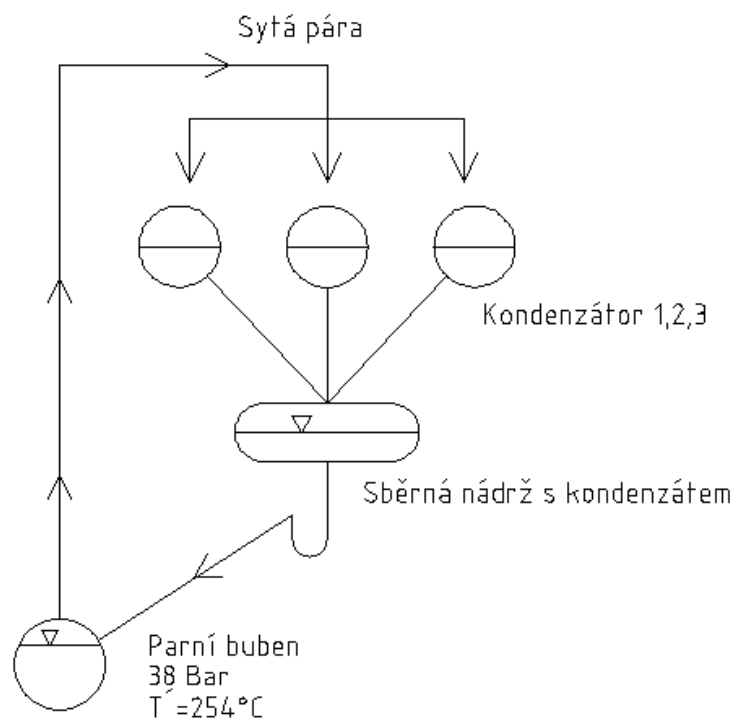


Obr. 12-2 Schéma kondenzátoru

Pokud nastane problém s velikostí teplosměnné plochy, jako je třeba její nedostatečná velikost a kondenzátor je omezen prostorem vnějšího pláště, lze využít i jiné uspořádání. Obr. 12-3 znázorňuje použití zdvojeného kondenzátoru. Na Obr. 12-4 je znázorněno použití většího počtu kondenzátorů.



Obr. 12-3 Schéma kondenzátoru



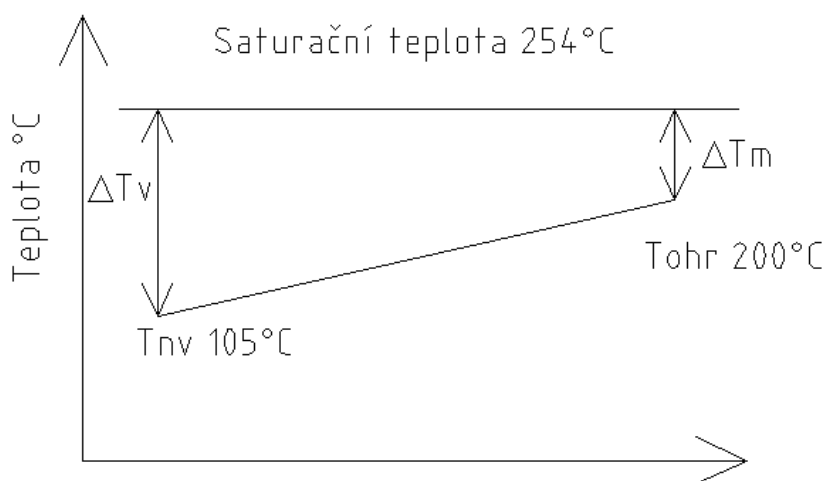
Obr. 12-4 Schéma uspořádání kondenzátorů

13. Změna teploty vstupní ohřáté vody

V bilančních výpočtech vybraného řešení jsem podle zadání stanovil hodnotu ohřáté vody na $t_{\text{OHR}} = 200^\circ\text{C}$. V této kapitole budu řešit vliv rozdílné teploty ohřevu vody na dané parametry.

13.1. Rozdíl teploty ohřevu vody na teplotě větší a menší než zadaných 200°C

Na Grafu 13-1 je znázorněn rozdíl teploty větší Δt_V a menší Δt_M . Kdy tento rozdíl závisí na právě zvolené teplotě ohřáté vody t_{OHR} . Saturační teplota $t_{\text{SAT}} = 254^\circ\text{C}$ v kotli je konstantní. V mém případě je teplota napájecí vody $t_{\text{NV}} = 105^\circ\text{C}$, ta je také konstantní a teplotu ohřáté vody t_{OHR} budu volit v rozmezí od 160°C do 220°C .



Graf. 13-1

Z grafu 13-1 je patrné že $\Delta t_V = 149^\circ\text{C}$ je rozdíl saturační teploty $t_{\text{SAT}} = 254^\circ\text{C}$ a teploty napájecí vody $t_{\text{NV}} = 105^\circ\text{C}$.

Výpočet

$$\Delta t_V = t_{\text{SAT}} - t_{\text{NV}} [^\circ\text{C}] \quad [13.1]$$

$$\Delta t_V = 254 - 105$$

$$\Delta t_V = 149 [^\circ\text{C}]$$

$$\Delta t_m = t_{SAT} - t_{OHR} [^{\circ}C] \quad [13.2]$$

$$\Delta t_m = 254 - 200$$

$$\Delta t_m = 54 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t = \Delta t_v - \Delta t_m [^{\circ}C] \quad [13.3]$$

$$\Delta t = 149 - 54$$

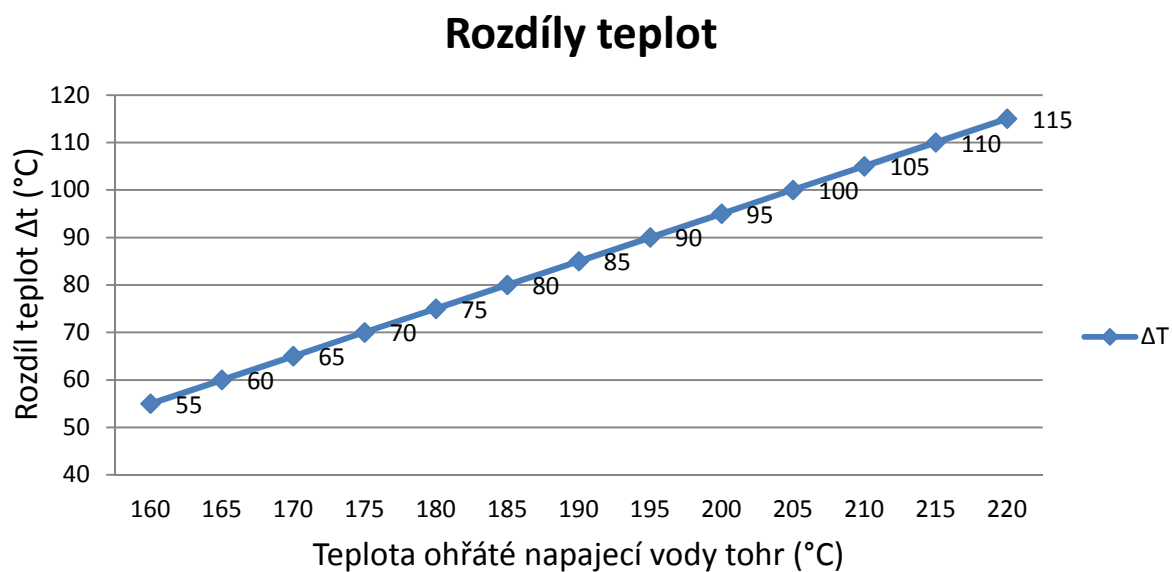
$$\Delta t = 95 [^{\circ}C]$$

Vypočtené hodnoty pro ostatní zvolené teploty t_{OHR} .

$t_{OHR} [^{\circ}C]$	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
$\Delta t_M [^{\circ}C]$	94	89	84	79	74	69	64	59	54	49	44	39	34
$\Delta t [^{\circ}C]$	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115

Tab. 13-1 Tabulka s výslednými hodnotami

Výsledky vypočítaných hodnot jsou zaznamenány v grafu 13-2. Z kterého je patrné že s rostoucí teplotou t_{OHR} dochází ke zvýšení teplotního rozdílu.



Graf. 13-2 Rozdílu teplot vůči teplotě napájecí vody

13.2. Střední logaritmický rozdíl teplot

Výpočet:

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} [^{\circ}\text{C}] \quad [13.4]$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{149 - 54}{\ln \frac{149}{54}}$$

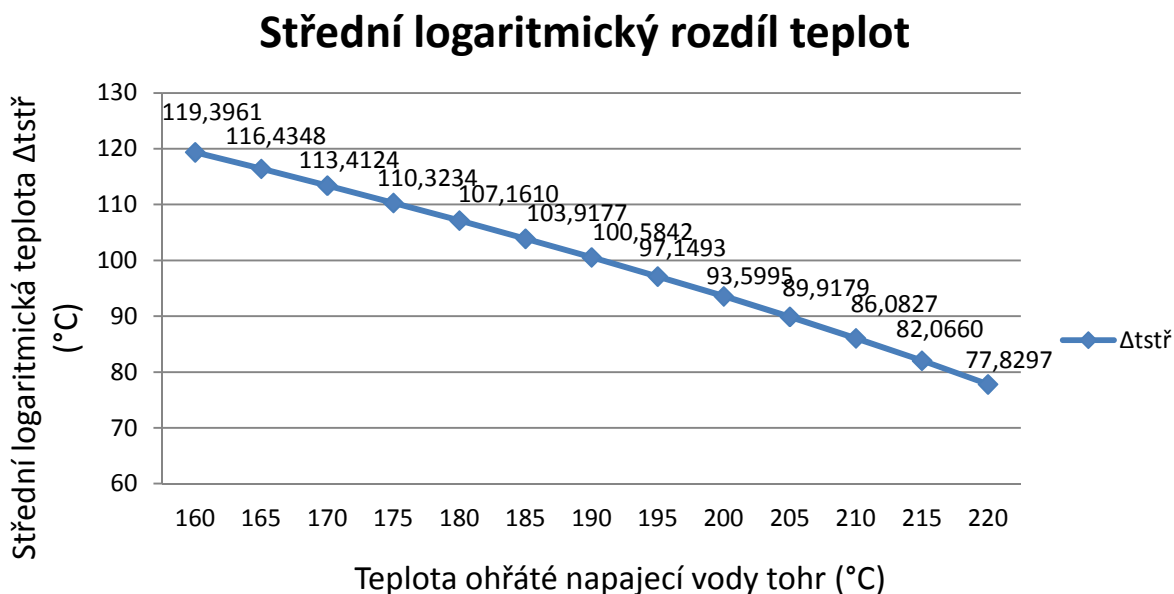
$$\Delta t_{stř} = 93,6 [^{\circ}\text{C}]$$

Vypočtené hodnoty logaritmického spádu pro ostatní zvolené teploty přehřevu.

$t_{ohř}[^{\circ}\text{C}]$	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
$\Delta t_{stř}[^{\circ}\text{C}]$	119,4	116,4	113,4	110,3	107,2	103,9	100,6	97,1	93,6	89,9	86,1	82,1	77,8

Tab. 13-2 Tabulka s výslednými hodnotami

V grafu 13-3 je patrné že s rostoucí teplotou ohřáté vody t_{OHR} dochází ke snižování středního logaritmického rozdílu teplot $\Delta t_{stř}$.



Graf. 13-3 Střední log. Teplota vůči teplotě napájecí vody

13.3. Procentuální poměr změny plochy v závislosti na střední logaritmické hodnotě

Teplo předané plochou

$$Q = m_{nv} \cdot (i_{115} - i_{105}) \text{ [kW]} \quad [13.5]$$

$$Q = 13 \cdot (485,2 - 443)$$

$$Q = 548,6 \text{ [kW]}$$

Výpočet potřebné teplosměnné plochy potřebné k ohřevu vody

Sestavení rovnic pro různé stavy

$$Q_1 = k_1 \cdot S_1 \cdot \Delta t_{stř1} \text{ [kW]} \quad \text{pro stav „1“} \quad [13.6]$$

$$Q_2 = k_2 \cdot S_2 \cdot \Delta t_{stř2} \text{ [kW]} \quad \text{pro stav „2“}$$

Úprava rovnic

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{S_1 \cdot \Delta t_{stř1}}{S_2 \cdot \Delta t_{stř2}} \quad [13.7]$$

$$1 = \frac{S_1 \cdot \Delta t_{stř1}}{S_2 \cdot \Delta t_{stř2}}$$

$$S_2 = \frac{S_1 \cdot \Delta t_{stř1}}{\Delta t_{stř2}} \quad [13.8]$$

$$S_2 = \frac{1 \cdot 93,6}{119,396}$$

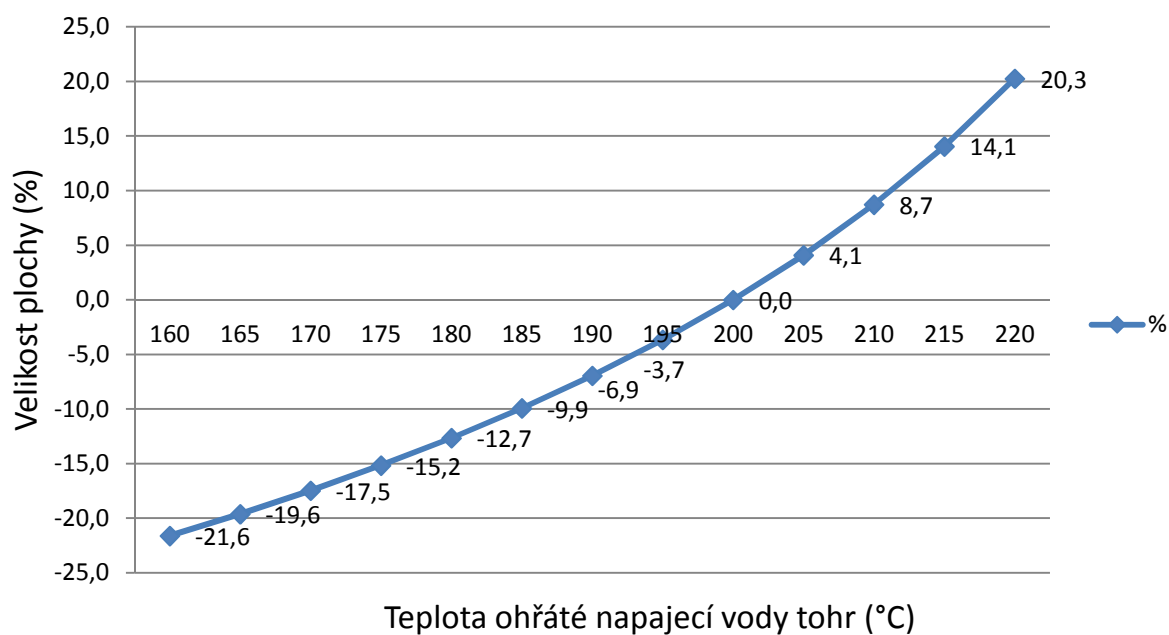
$$S_2 = 0,784 \text{ [1]}$$

Pro S_1 při ohřevu na 200°C volím hodnotu 1, ta bude sloužit jako porovnávací, při středním logaritmickém rozdílu teplot $\Delta t_{stř1} = 93,6^\circ\text{C}$. Za $\Delta t_{stř2}$ budu dosazovat střední logaritmické rozdíly při různých teplotách ohřáté vody. Výsledné hodnoty pro různé teploty jsou uvedeny v tabulce 13-3.

$t_{ohř} [^\circ\text{C}]$	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
$S_2 [-]$	0,784	0,804	0,825	0,848	0,873	0,901	0,931	0,963	1	1,041	1,087	1,141	1,203
%	-21,6	-19,6	-17,5	-15,2	-12,7	-9,9	-6,9	-3,7	0	4,1	8,7	14,1	20,3

Tab. 13-3 Tabulka s výslednými hodnotami

**Procentuální změny velikosti plochy v závislosti na střední
logaritmické hodnotě - porovnávací teplota je 200°C**



Graf. 13-4 Procentuální změny velikosti plochy v závislosti na střední logaritmické hodnotě

14. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout řešení pro zamezení vzniku nízkoteplotní koroze v oblasti ekonomizéru u parního kotle bez ohříváku vzduchu. Teoretická část zahrnuje úvodní seznámení se způsobem využití parních kotlů jako energetických zařízení. Jsou popsány procesy, jako je spalování na roštu a možnost jejich regulace. Následně jsem se zaměřil na problematiku nízkoteplotní koroze a rosného bodu při spalování uhlí, její definici a možnosti její eliminace.

Základní výpočtová část obsahuje stechiometrické výpočty a výpočty složení množství spalin při spalování černého uhlí. Další část zahrnuje výpočet tepelné bilance a výrobního tepla v parním kotli. Pomocí bilančních výpočtů bylo stanoveno potřebné množství napájecí vody, množství odluhu a výrobní teplo parního kotle. Dále byly stanoveny ztráty, účinnost kotle a spotřeba paliva.

Řešení problému je část obsahující návrh dvou alternativ ohřevu napájecí vody. Jeden způsob ohřevu je proveden pomocí kotelní vody z bubnu a druhý sytou parou v kondenzátoru. Kde popisují jejich stručný popis a schéma. Dle mého uvážení jsem vybral vhodnější uspořádání ohřevu sytou parou v kondenzátoru. Toto řešení je sice dražší, ale nezasahuje do prostoru parního bubnu. Tepelnou bilancí bylo stanovení množství ohřívání vody pro dosažení požadované teploty $t_{nv} = 115^{\circ}\text{C}$ před ekonomizérem.

Další výpočty slouží k porovnávání změn parametrů předeřevu v závislosti na teplotě ohřáté vody t_{ohr} v rozmezí od 160°C do 220°C . To se projeví jak na množství, střední logaritmické teplotě a procentuální změně velikosti plochy.

Poděkování:

Chtěl bych tímto poděkovat doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi za cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce.

15. Seznam použité literatury

- [1] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I*. OSTRAVA: VŠB - TU, 2002, 116 s.
- [2] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*. OSTRAVA: VŠB - TU, 1999, 151s.
- [3] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 212 s.
- [4] VILIMEC, Ladislav. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB – TU Ostrava, 2008, 224 s.
- [5] *Zdroje tepla: Kotle na tuhá paliva*. [online]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/8438-kotle-2-cast>
- [6] *SEA CZ: Tepelní energetika* [online]. Dostupné z: http://www.seacz.cz/katalogove_listy.php